Operationele versterkers

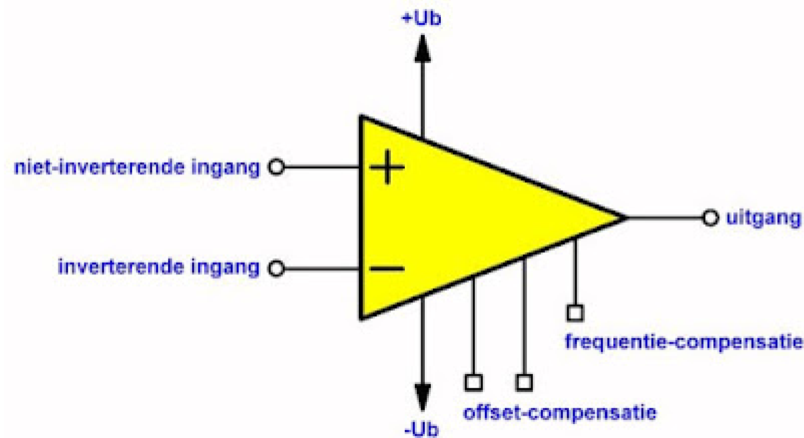
Een operationele versterker of op-amp is een analoog IC met twee ingangen en één uitgang. De schakeling heeft een zeer hoge versterkingsfactor en versterkt het spanningsverschil tussen beide ingangen. Op dit principe werkt een aantal schakelingen die ook in dit artikel worden besproken.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 15-09-2020

Kennismaking met de operationele versterker

Inleiding
Onder de verzamelnaam '*operationele versterkers*' worden geïntegreerde schakelingen gegroepeerd waarmee u lineaire bewerkingen (optellen, aftrekken, versterken, verzwakken) op analoge spanningen kunt uitvoeren. In de praktijk is een operationele versterker uitgevoerd als gelijkspanning verschilversterker met zeer hoge open-lus versterking, waarbij de specifieke eigenschappen hoofdzakelijk worden bepaald door de terugkoppeling die u tussen de uitgang en een van de ingangen (soms beide) aanbrengt.
Operationele versterkers worden meestal op-amp's genoemd, afkorting van de Engelse benaming '*operational amplifier*'.

Het symbool van een op-amp
Het algemene symbool van een operationele versterkers is getekend in de onderstaande figuur. Het driehoekje symboliseert de versterker, de twee ingangen corresponderen met respectievelijk de inverterende (-) en de niet-inverterende (+) ingang van de differentiële ingangstrap. Deze ingangen worden ook wel positief en negatief genoemd. De letter A in de driehoek stelt in de meeste gevallen de open-lus spanningsversterking voor. Open-lus betekent dat er geen terugkoppeling is aangebracht van de uitgang naar een of naar beide ingangen.
Uiteraard moet u de schakeling voeden, dus bij iedere op-amp treft u twee pennen aan $+U_b$ en $-U_b$ voor de voeding van de schakeling. Hoewel men in praktische op-amp schakelingen meestal werkt met twee symmetrische voedingen, bijvoorbeeld +12 V en -12 V, kunt u op-amp's ook asymmetrisch voeden, waarbij $-U_b$ met de massa wordt verbonden.
In de meeste schema's worden deze voedingsaansluitingen echter weggelaten om het schema niet onnodig complex te maken. Ook in dit artikel zult u nergens deze aansluitingen op de schema's zien.
Sommige exemplaren hebben nog twee aansluitingen voor de offset-compensatie (lees verder) en soms is er nog een extra aansluiting aanwezig voor de frequentie-compensatie (lees verder).



Het standaard symbool van een op-amp met alle in- en uitgangen.
(© 2020 Jos Verstraten)

De transfer-functie van een op-amp
De transfer-functie van een elektronische schakeling geeft het wiskundig verband tussen de grootheden op de ingang(en) en de grootheid op de uitgang. In het geval van een op-amp zonder terugkoppeling (open-lus) gaat het over spanningen en wordt de transfer-functie:
$U_{uit} = A \cdot [U_{+} - U_{-}] = A \cdot \Delta U$
Een operationele versterker berekent dus het spanningsverschil ΔU tussen het signaal op de positieve ingang ten opzichte van de massa en het signaal op de negatieve ingang ten opzichte van de massa en vermenigvuldigt dit spanningsverschil ΔU met de open-lus versterking A van de schakeling.

De specificaties van een op-amp

De op-amp, een ideale versterker?
Een ideale versterker wordt gekarakteriseerd door de volgende eigenschappen:
- Oneindig hoge open-lus versterking
- Oneindig hoge ingangsweerstand
- Uitgangsweerstand gelijk aan 0 Ω
- Oneindig grote bandbreedte
- Geen offset-verschijnselen
- Oneindig kleine respons-tijd (slew-rate)
- Ongevoelig voor symmetrische spanningsfluctuaties op de ingangen.

Het zal duidelijk zijn dat een praktische operationele versterker niet aan deze ideale eisen voldoet, niet alleen omdat er technologische beperkingen bestaan, maar ook omdat bepaalde eisen in theoretische tegenspraak zijn. Zo kan een versterker niet een oneindig hoge versterking én een oneindig hoge bandbreedte hebben! In de volgende paragrafen zullen de verschillende eigenschappen afzonderlijk worden besproken.

De open-lus spanningsversterking
De meeste types hebben een open-lus spanningsversterking van minstens 10.000 (80 dB). Er zijn tegenwoordig zelfs op-amp's op de markt met een gegarandeerde open-lus versterking van meer dan 120 dB (x 1.000.000). Echter, zelfs een versterking van 80 dB is veel te groot voor de meeste schakelingen waarin u een operationele versterker toegepast. U moet de open-lus versterking vrijwel steeds door middel van terugkoppelingen reduceren. Dat betekent dat u tussen de uitgang en de inverterende ingang minstens één weerstand moet aanbrengen en tussen deze ingang en de massa een tweede weerstand. Wij komen daar later in dit artikel op terug.

De ingangsweerstand
De ingangsweerstand van een operationele versterker wordt steeds differentieel opgegeven, dus gemeten tussen beide ingangen in open-lus conditie. De waarde van deze grootheid

hangt af van de manier waarop de differentiële ingangstrap van het onderdeel is vorm gegeven. Als deze versterker met gewone transistoren is uitgevoerd (bipolaire op-amp's) zal de ingangsweerstand niet veel hoger zijn dan enkele MΩ. Operationele versterkers met een darlington-schakeling in de ingang hebben een ingangsweerstand tussen 10 MΩ en 30 MΩ. Moderne IC's met FET- of MOS-ingangen hebben een zo goed als oneindige ingangsweerstand: van 100 GΩ tot niet minder dan 1.000 GΩ.
Hierbij moet worden opgemerkt dat deze gegevens gelden voor de '*kale*' op-amp. Door gebruik te maken van terugkoppelingstechnieken kunt u ook op-amp's met gewone transistor ingangen wat deze eigenschap betreft oppeppen tot GΩ's.

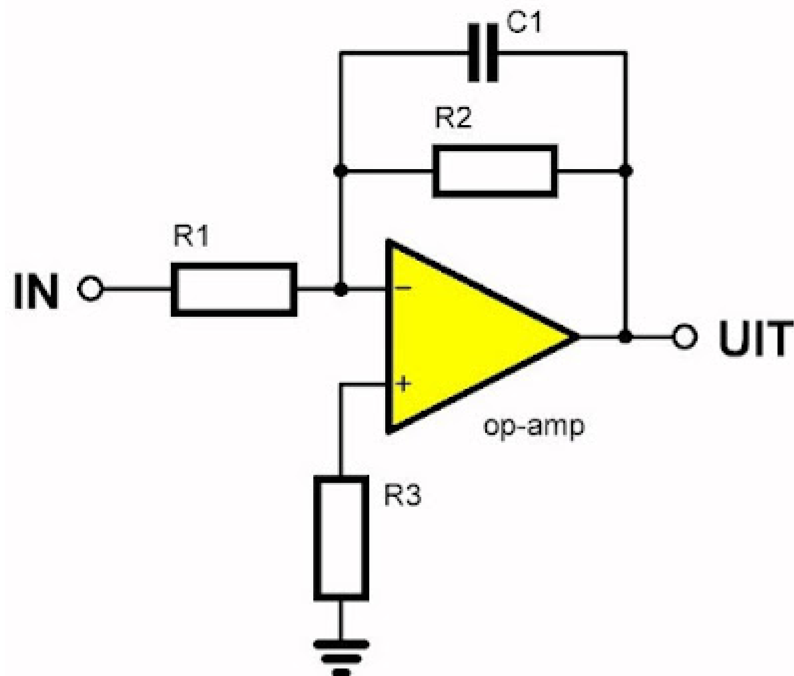
De uitgangsweerstand
De uitgangsweerstand van een operationele versterker in open-lus ligt meestal tussen 10 Ω en 1 kΩ. Ook deze parameter kunt u echter door het aanbrengen van een terugkoppeling beïnvloeden. Er zijn echter speciale op-amp's op de markt die grote uitgangsstromen kunnen leveren en waarvan de uitgangsweerstand in het gebied van 0,1 Ω tot 1 Ω ligt.

De bandbreedte
In de praktijk zal de open-lus versterking afnemen in functie van de frequentie om bij een welbepaalde frequentie gelijk te worden aan 1 (0 dB). De bandbreedte van een operationele versterker kan op verschillende manieren worden gespecificeerd:

- **BW**
  '*Bandwidth*' geeft de frequentie waarbij de open-lus versterking tot 0,707 (-3 dB) is gedaald ten opzichte van de versterking bij een bepaalde referentie frequentie (meestal 1 kHz).
- **GBP**
  '*Gain-Bandwith Product*' geeft het product van de open-lus versterking en de bandbreedte waarbij deze grootheid is gemeten.
- **f_t**
  '*Unity-gain frequency*' geeft de frequentie waarbij de open-lus versterking tot 1 (0 dB) is gedaald.

De meeste fabrikanten geven de GBP-waarde voor hun producten. In het algemeen kunt u uit deze grootheid de waarde van de -3 dB frequentie berekenen door het toepassen van de formule:
f_{-3dB} = GBP / open-lus versterking
U zult vaststellen dat het resultaat verrassend laag is, de bandbreedte van een reële op-amp schakeling wordt dan ook voornamelijk bepaald door de terugkoppeling.
Praktische waarden van de GBP-factor lopen uiteen van 75 kHz tot meer dan 75 MHz.

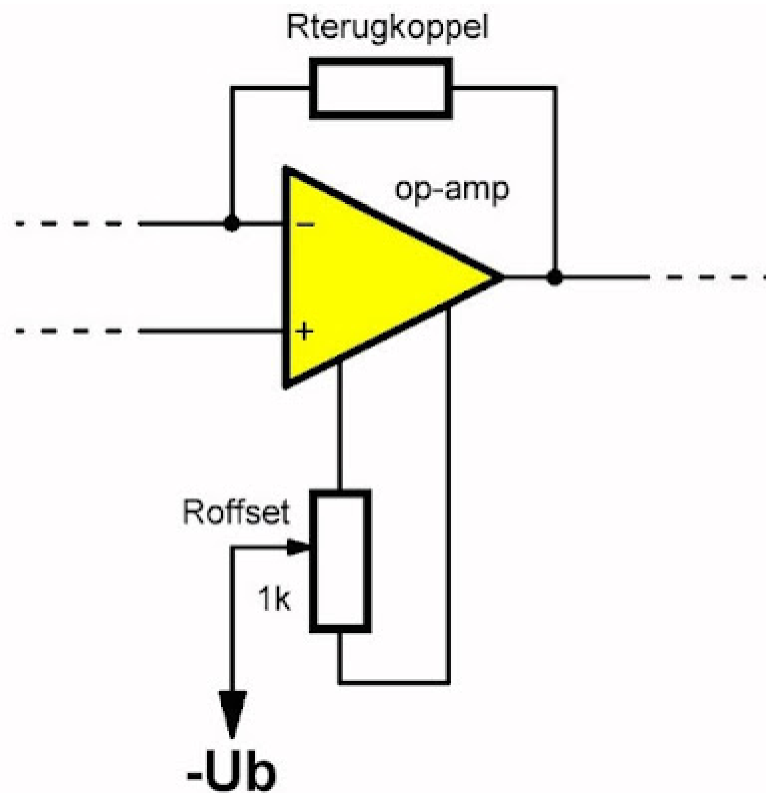
De frequentie-compensatie
De frequentie-compensatie hoort bij de standaard schakelingen rond operationele versterkers. De frequentie-compensatie heeft tot opdracht de schakeling te stabiliseren tegen eigen oscillaties. Dat doet men door de bandbreedte van de schakeling kleiner te maken. In de meeste gevallen bestaat deze compensatie uit een kleine condensator C1, geschakeld tussen de uitgang en de inverterende ingang. Bij sommige types is deze condensator in de chip geïntegreerd, zoals bij de overbekende 741.
De waarde van de condensator wordt berekend aan de hand van de volgende formule:
$C1 = 1 / [2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R2]$
Hierin staat π voor het getal 3,14 en f_0 voor de maximaal te versterken frequentie van de schakeling.



De standaard schakeling voor frequentie-compensatie.
(© 2020 Jos Verstraten)

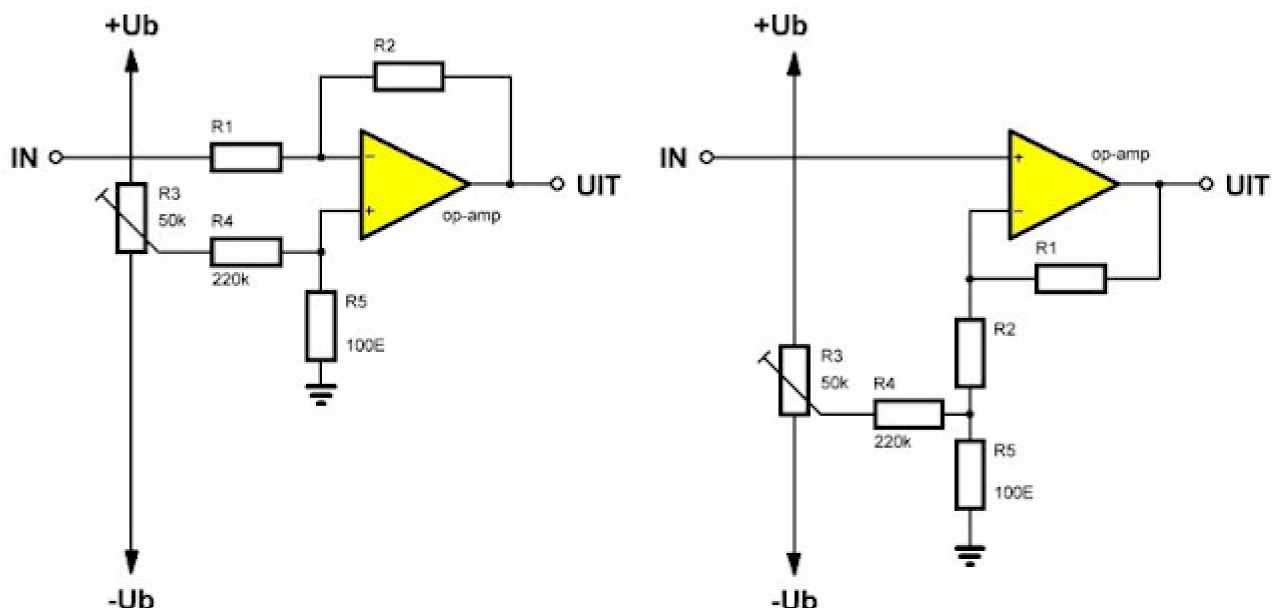
De offset-verschijnselen
Uit de principiële overdracht-functie van een op-amp kunt u afleiden dat als u beide ingangen op dezelfde spanning aansluit de uitgangsspanning gelijk moet zijn aan nul. In de praktijk zal dat echter niet het geval zijn en moet u een klein spanningsverschil tussen beide ingangen introduceren om de uitgang op nul te krijgen.
Deze kleine spanning noemt men de '*offset*' van de schakeling. Deze offset-spanning ligt in het gebied tussen enige tienden van een millivolt en enige tientallen mV. Voor het versterken van zeer kleine gelijkspanningen worden speciale op-amp's vervaardigd, de zogenaamde instrumentatie-versterkers of chopper-gestabiliseerde schakelingen. Deze worden gekenmerkt door een extreem lage offset-spanning: enige tientallen µV.

Offset-compensatie
In de praktijk zal het vaak noodzakelijk blijken de offset-spanning te compenseren. De offset-spanning kan worden beschouwd als een kleine gelijkspanning die in serie met het te versterken signaal tussen beide ingangen wordt aangesloten. Ook deze offset-spanning zal door de schakeling worden versterkt. Een offset van 1 mV leidt bij een schakeling met een gesloten-lus versterking van 1.000 tot een afwijking van 1 V op de uitgang! Vandaar dat sommige operationele versterkers zijn voorzien van twee offset-aansluitingen, waartussen u een potentiometer moet aansluiten en waarvan de loper naar de negatieve voedingsspanning gaat. Door het verdraaien van de loper kunt u de onbalans in de differentiële ingangsversterker, die de oorzaak is van de offset, compenseren.



Compenseren van de offset bij op-amp's met offset-aansluitingen.
(© 2020 Jos Verstraten)

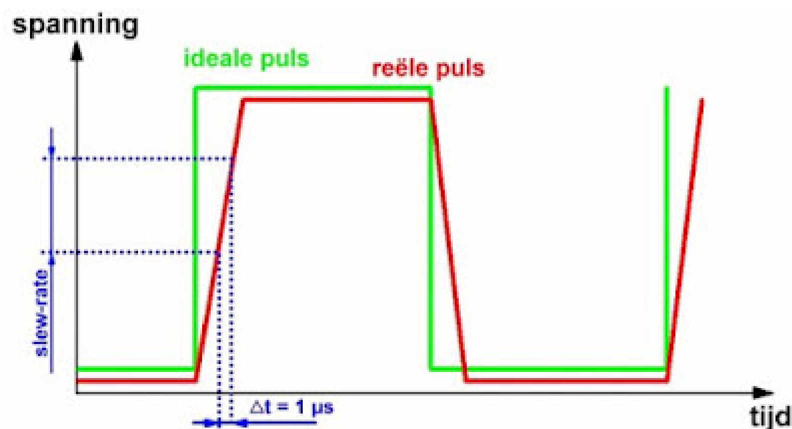
Een heleboel op-amp's hebben echter geen offset-aansluitingen. Dan moet u de offset compenseren door extern bij het ingangssignaal een kleine instelspanning op te tellen of af te trekken.
In de onderstaande figuur ziet u voorbeelden van deze externe offset-compensatie. De linker schakeling is bruikbaar bij inverterende versterkers. De offset wordt gecompenseerd door aan de niet-inverterende ingang een kleine spanning aan te leggen die even groot is als de offset van de op-amp, maar de tegengestelde polariteit heeft. Dat doet u door de niet-inverterende ingang niet aan de massa te leggen, maar aan een heel kleine spanning die ontstaat over de weerstand R5. Met de instelpotentiometer R3 regelt u deze spanning positief of negatief.
Het rechter schema geeft de offset-compensatie voor niet-inverterende versterkers. Nu wordt de compensatie-spanning aangeboden aan de inverterende ingang. De versterkingsfactor van de schakeling wordt echter door deze compensatie iets beïnvloed, omdat de kleine weerstand R5 in serie is geschakeld is met de versterking bepalende weerstand R2.



Compenseren van de offset bij op-amp's zonder offset-aansluitingen. (© 2020 Jos Verstraten)

De ingangsstromen
Omdat de ingangsweerstand van een op-amp niet oneindig groot is zullen de ingangen stroom vragen van de voorafgaande schakeling. De ingangsstroom wordt gedefinieerd als de gemiddelde waarde van de twee stromen die in de twee ingangen vloeien als de uitgangsspanning gelijk is aan nul. Deze ingangsstroom varieert van 100 pA tot meer dan 100 µA, afhankelijk van de ingangsschakelingen.
Door de onbalans in de ingangsschakelingen ontstaat er een verschil tussen de stromen die in de positieve en de negatieve ingangskringen vloeien. Het verschil tussen beide stromen noemt men de ingangs-offset-stroom.

De slew-rate ΔV/Δt
In het ideale geval moet de uitgang van een op-amp zonder vertraging reageren op plotselinge spanningsvariaties op de ingangen. Omdat er in een praktische schakeling een groot aantal parasitaire capaciteiten aanwezig zijn, die een bepaalde op- en ontlaadtijd nodig hebben, zal deze ideale situatie niet haalbaar zijn.
De reactietijd van een operationele versterker wordt gedefinieerd door de slew-rate. Deze factor wordt uitgedrukt in een aantal V/µs en geeft aan hoe snel de spanning op de uitgang kan variëren. Bij goedkope operationele versterkers ligt de slew-rate tussen 0,02 V/µs en 25 V/µs.
De slew-rate van een op-amp wordt gemeten bij een spanningsvolger, dus als niet inverterende versterker met een spanningsversterking van +1. Voor speciale toepassingen worden er zogenaamde '*high slew rate*' operationele versterkers gefabriceerd met een ΔV/Δt-factor tot wel 2.500 V/µs.



Het begrip 'slew-rate' grafisch toegelicht. (© 2020 Jos Verstraten)

De common mode rejection ratio, CMRR
In principe zou de uitgang van een op-amp alleen mogen reageren op spanningsverschillen tussen de beide ingangen. In de praktijk zal een op-amp echter ook een uitgangssignaal afleveren als de spanningen op beide ingangen in dezelfde mate variëren. De mate waarin een schakeling last heeft van dit verschijnsel wordt gedefinieerd door de zogenaamde '*common mode rejection ratio*', afgekort tot CMRR.
De CMRR-factor wordt opgegeven voor gelijkspanningen of voor zeer lage wisselspanningen. De meeste schakelingen hebben een CMRR van meer dan 80 dB, waarden tot 120 dB zijn tegenwoordig geen uitzondering.
Stel dat een bepaalde op-amp een CMRR heeft van 80 dB. Wat betekent dat? 80 dB komt overeen met een spanningsverhouding van 1/10.000. Dat betekent dus dat er maar 1/10.000 V op de uitgang van de op-amp overblijft van iedere common mode volt op de ingangen.

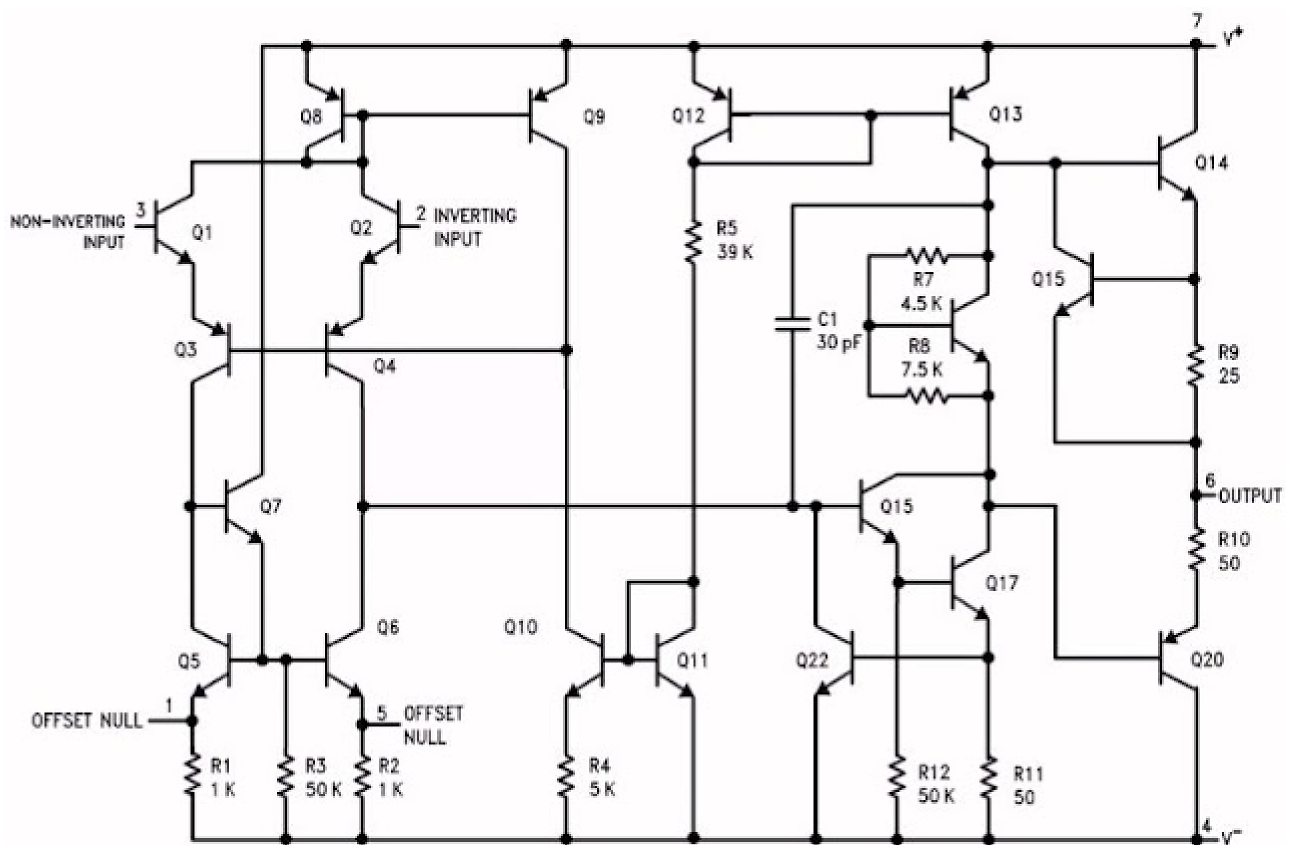
De power supply rejection ratio, PSRR
De theoretische op-amp werkt volledig onafhankelijk van de waarde en de conditie van de voedingsspanning(en). In de praktijk zult u echter vaststellen dat alle schakelingen in min of meerdere mate beïnvloed worden door fluctuaties op de voeding(en). De mate waarin een schakeling reageert op veranderingen op de voedingsspanning wordt aangegeven door de '*power supply rejection ratio*', afgekort tot PSRR. Deze factor wordt gedefinieerd als de in dB

uitgedrukte verhouding tussen de verandering in de voedingsspanning ΔU_b en de daaruit volgende variatie in de offsetspanning ΔU_{offset}. In formule-vorm:
$PSRR_{dB} = 20 \cdot \log_{10} [\Delta U_b / \Delta U_{offset}]$

Soorten operationele versterkers

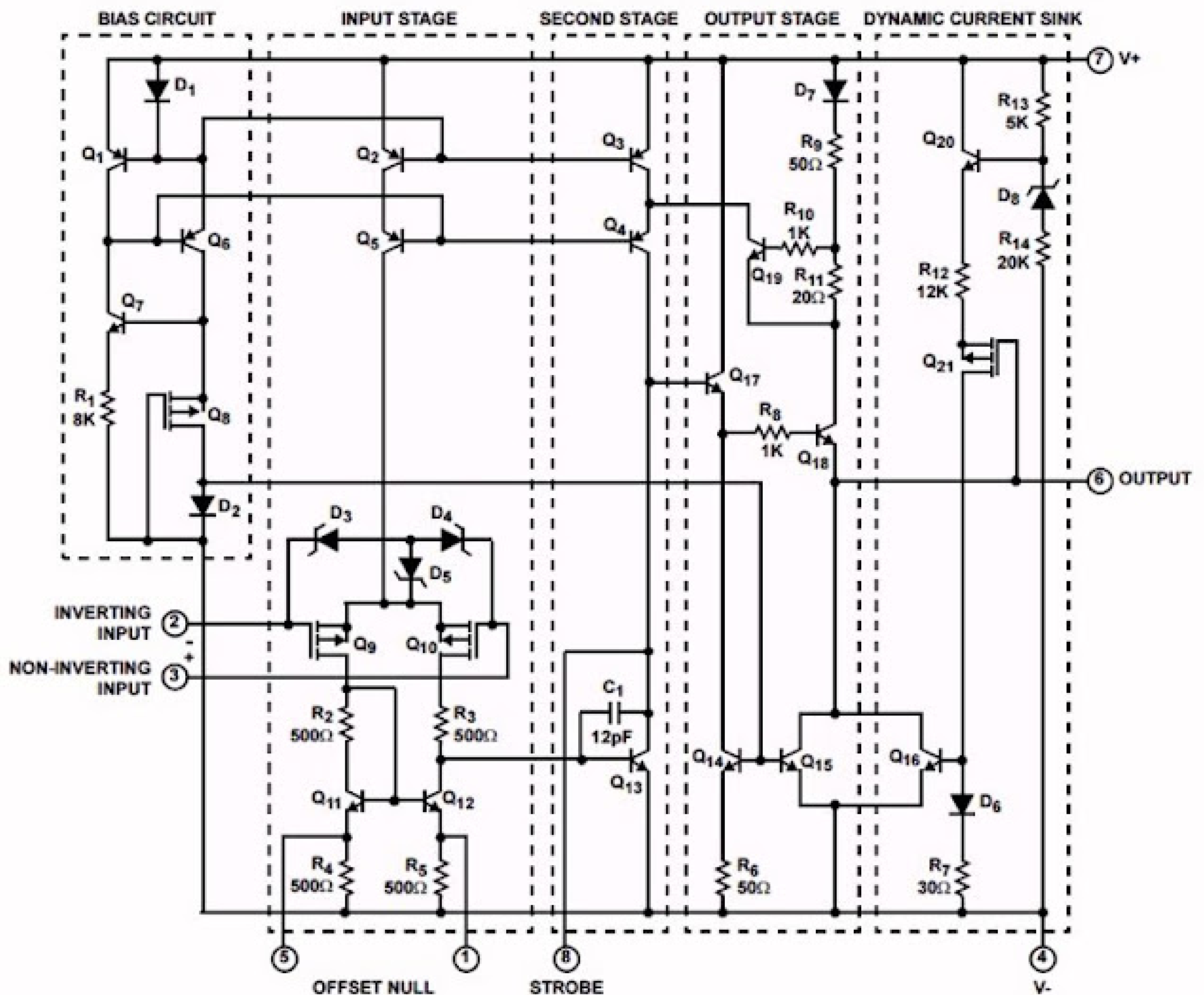
Inleiding
Omdat de operationele versterker het meest universele onderdeel van de analoge elektronica is, zijn er in de loop der jaren diverse uitvoeringen ontworpen voor specifieke toepassingen. Het grote aanbod aan schakelingen die als '*operationele versterker*' wordt aangeboden kunt u indelen in de onderstaande groepen.

Bipolaire operationele versterkers
Dat zijn schakelingen met normale transistoren in de ingangstrap, al dan niet in darlington configuratie. De bekende op-amp µA741 is daar een typisch voorbeeld van.



Intern schema van de 741 bipolaire op-amp. (© NatSemi)

Operationele versterkers met FET-ingang
De verschilversterker aan de ingang is opgebouwd met FET's of MOS-transistoren, met als gevolg zeer hoge ingangsweerstanden en zeer lage ingangsstromen. De al even bekende CA3140 is een typisch voorbeeld van een dergelijke op-amp.



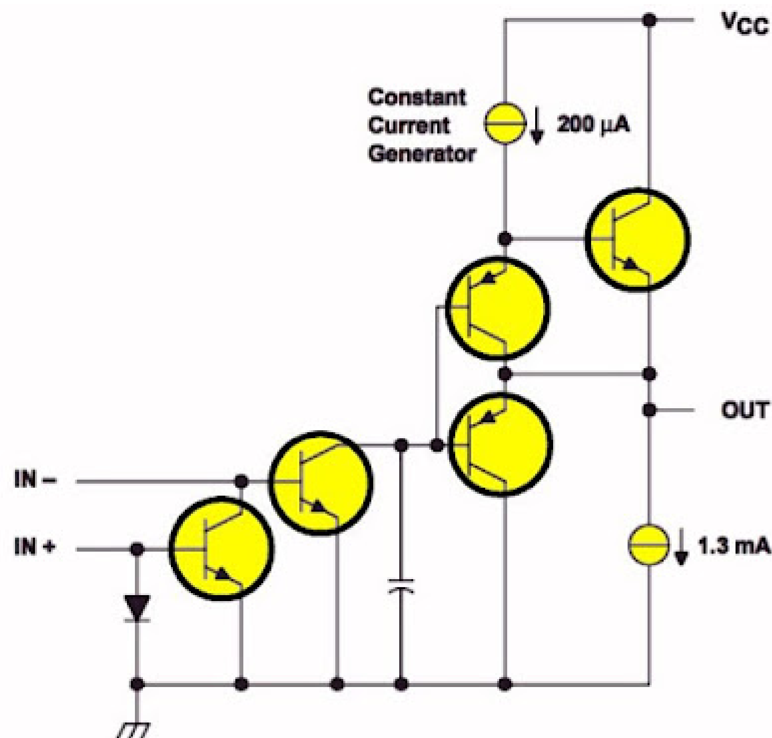
Intern schema van de CA3140 PMOS op-amp. (© Intersil)

Chopper-versterkers en instrumentatie-versterkers
Schakelingen met extreem lage drift eigenschappen en offset-karakteristieken, ontworpen voor het versterken van zeer lage gelijkspanningen (thermo-koppels).

Spanningsvolgers en analoge buffers
Operationele versterkers waarbij de inverterende ingang intern is verbonden met de uitgang, zodat een niet inverterende versterker met spanningsversterking van exact 1,000 ontstaat. Deze schakelingen hebben een zeer hoge ingangsweerstand en zeer lage uitgangsweerstand.

Operational transconductance amplifiers
Dat zijn speciale operationele versterkers (OTA's), die een uitgangsstroom leveren waarvan de waarde wordt bepaald door het spanningsverschil tussen beide ingangen en de grootte van een extern aan te brengen stuurstroom.

Norton-versterkers
Speciale operationele versterkers, ontwikkeld voor schakelingen die uit een lage enkelvoudige voeding gevoed moeten worden, maar die niet als rechtstreeks equivalent van de standaard op-amp opgevat kunnen worden. Dergelijke schakelingen worden immers gestuurd met twee ingangsstromen in plaats van twee ingangsspanningen.
Norton-versterkers (of stroomdifferentiatie versterkers) kunnen worden gebruikt in de meeste standaard schakelingen met operationele versterkers. Het voordeel is dat een bekend type als de LM2900 al werkt bij een enkelvoudige voedingsspanning van +4,5 V. Een norton-versterker is, geschakeld als gelijkstroomversterker en met zo'n lage enkelvoudige voeding, echter niet zo nauwkeurig als een standaard spanningsgestuurde op-amp.



Intern schema van de LM2900 norton-versterker. (© Texas Instruments)

Programmeerbare operationele versterkers
Schakelingen waarbij u de versterkingsfactor extern kunt instellen door het aanleggen van een bepaalde binaire code of spanning.

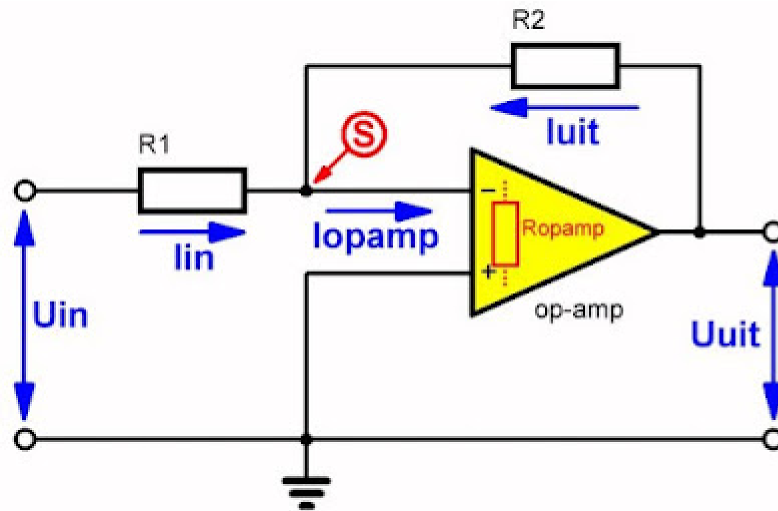
Operationele versterkers voor hoge uitgangsspanningen en/of -stromen
Schakelingen die speciaal ontworpen zijn voor het besturen van motoren of eindversterkers, maar die wel volgens de standaard op-amp technieken zijn ontworpen.

Operationele versterkers met hoge slew-rate
Speciale schakelingen met een grote ΔV/Δt-verhouding op de uitgang.

Operationele versterkers met balans uitgangen
Schakelingen die twee in plaats van een uitgang hebben en waarbij de uitgangsspanning onder de vorm van een verschilspanning tussen beide uitgangen kan worden afgenomen.

Algemene voorbeeldschakelingen met op-amp's

De inverterende versterker
De open-lus versterking van een operationele versterker is voor de meeste praktische toepassingen veel te groot en bovendien te sterk aan spreiding onderhevig. Door middel van een terugkoppeling van de uitgang naar de inverterende ingang volgens het schema van de onderstaande figuur kunt u de versterking op een alleen maar door de twee weerstanden bepaalde waarde instellen.

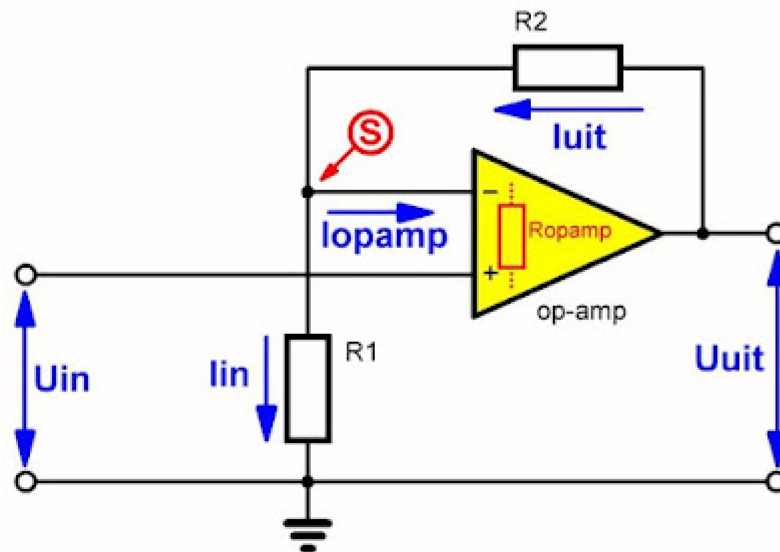


De inverterende versterker. (© 2020 Jos Verstraten)

De werking kan met de wetten van Ohm en Kirchoff volledig wiskundig worden beschreven.
Voor het punt S geldt:
$I_{in} + I_{uit} - I_{opamp} = 0$
Omdat wij bij deze berekening uitgaan van een ideale op-amp kunt u aannemen dat de ingangsweerstand R_{opamp} van de schakeling oneindig hoog is. Het gevolg is dat de stroom I_{opamp} gelijk is aan nul.
De bovenstaande formule wordt dan:
$I_{in} + I_{uit} = 0$
De twee stromen kunt u met de wet van Ohm berekenen als:
$I_{in} = U_{in} / R1$
$I_{uit} = U_{uit} / R2$
Vergeet niet dat de op-amp zijn uitgangsspanning zo instelt dat de spanning op zijn beide ingangen aan elkaar worden. De positieve ingang ligt aan de massa, de negatieve moet dus ook virtueel aan de massa liggen. U kunt de spanning op punt S dus zonder problemen gelijk stellen aan 0 V.
Als u deze twee uitdrukkingen invult in de bovenstaande formule krijgt u:
$[U_{in} / R1] + [U_{uit} / R2] = 0$
0f:
$[U_{in} / R1] = -[U_{uit} / R2]$
Met wat eenvoudige algebra kunt u dit omzetten in:
$U_{uit} = -[U_{in} \cdot (R2 / R1)]$
De uitgangsspanning is dus afhankelijk van de grootte van de ingangsspanning en van de verhouding van de twee weerstanden in de terugkoppeling. Als u deze twee weerstanden even groot maakt wordt de vergelijking gereduceerd tot:
$U_{uit} = -U_{in}$
De uitgangsspanning is dan even groot als de ingangsspanning, maar heeft de andere polariteit. Vandaar dat men deze schakeling een inverterende versterker noemt. Een positieve spanning aan de ingang wordt omgezet in een al dan niet versterkte negatieve spanning op de uitgang. Dit verhaal gaat natuurlijk alleen op als u de operationele versterker met twee symmetrische spanningen voedt.

De niet-inverterende versterker
De niet-inverterende versterker is getekend in de onderstaande figuur. De ingangsspanning wordt rechtstreeks aangeboden aan de niet-inverterende ingang. Omdat de op-amp het spanningsverschil tussen zijn ingangen zo klein mogelijk wilt maken zal de U_{in} ook te vinden zijn op de inverterende ingang. Deze spanning staat dus ook over R1. Met deze wetenschap in het achterhoofd kunt u voor het sommeerpunt S schrijven:
$I_{in} - I_{uit} = 0$
Of:
$I_{in} = U_{uit}$
Dus:

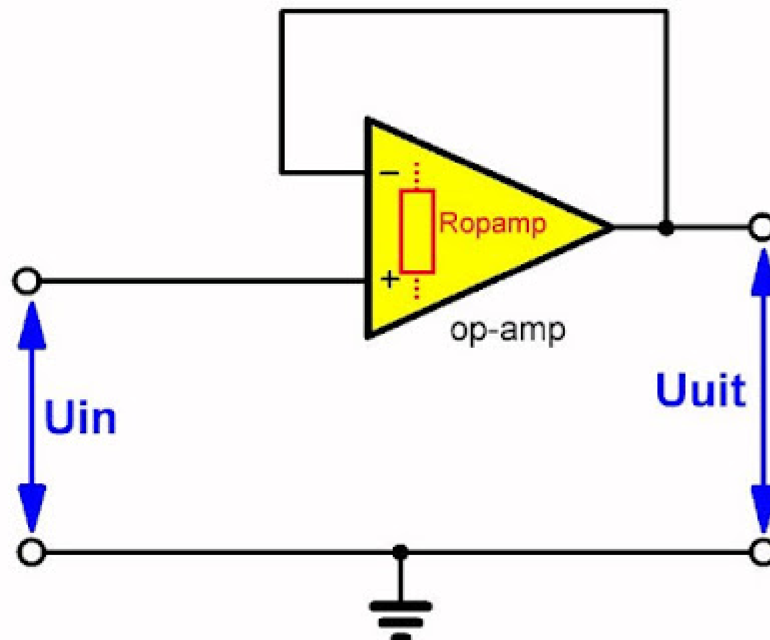
$[U_{in} / R1] = [(U_{uit} - U_{in}) / R2]$
Hieruit kunt u, met wat simpele algebra, de waarde van de uitgangsspanning berekenen. Wij gaan even stap na stap te werk:
$[U_{in} \cdot R2] = [U_{uit} - U_{in}] \cdot R1$
$[U_{in} \cdot R2] = [U_{uit} \cdot R1] - [U_{in} \cdot R1]$
$[U_{uit} \cdot R1] = [U_{in} \cdot R2] + [U_{in} \cdot R1]$
$[U_{uit} \cdot R1] = U_{in} \cdot [R2 + R1]$
$U_{uit} = U_{in} \cdot [(R2 + R1) / R1]$
Deze uitdrukking geeft de algemene formule voor een operationele versterker waarbij het terugkoppel netwerk is geschakeld tussen de uitgang en de inverterende ingang en waarbij de ingangsspanning aan de positieve ingang wordt aangeboden.



De niet-inverterende versterker. (© 2020 Jos Verstraten)

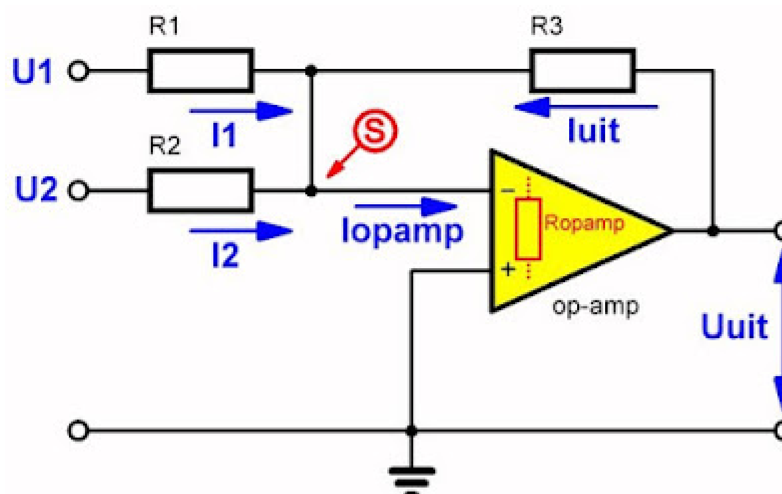
Het belangrijkste voordeel van deze schakeling is dat de ingangsweerstand die het ingangssignaal ziet zeer groot is. Deze is immers gelijk aan de ingangsweerstand van de op-amp zélf en deze is zeer groot. U kunt rustig stellen dat de ingangsspanning niet wordt belast.

De spanningsbuffer
Als u in het vorige schema de waarde van R2 gelijk stelt aan nul, dus de uitgang volgens het onderstaande schema rechtstreeks doorverbindt met de inverterende ingang, dan wordt de bovenstaande formule herleid tot:
$U_{uit} = U_{in} \cdot [(R2 + R1) / R1]$
$U_{uit} = U_{in} \cdot [(0 + R1) / R1]$
$U_{uit} = U_{in} \cdot [R1 / R1]$
$U_{uit} = U_{in}$
De uitgangsspanning is dan even groot als de ingangsspanning. De spanningsversterking is precies gelijk aan de eenheid. De ingangsweerstand van deze zogenaamde spanningsbuffer is zeer hoog (de ingangsweerstand van de op-amp zelf vermenigvuldigd met de open-lus versterking) en de uitgangsweerstand is zeer laag.
U kunt deze schakeling dus gebruiken om een hoogohmig punt aan te sluiten op een laagohmig punt, zoals bijvoorbeeld de uitgang van een versterker op een lange afgeschermde kabel.



De spanningsbuffer. (© 2020 Jos Verstraten)

De sommeer-versterker
U kunt het basisschema van de inverterende versterker uitbreiden door op het sommeer-punt S verschillende weerstanden aan te sluiten, die met verschillende ingangsspanningen worden verbonden. Het onderstaand schema geeft als voorbeeld een sommeer-versterker met twee ingangen. Denk er aan dat de inverterende ingang ook nu virtueel op het massapotentiaal staat.
Uit de wet van Kirchoff volgt:
$I_1 + I_2 + I_{uit} = 0$
$[U_1 / R1] + [U_2 / R2] + [U_{uit} / R3] = 0$
Als u R1 = R2 = Ruit kiest vereenvoudigt de vergelijking zich tot:
$U_{uit} = -[U_1 + U_2]$
De uitgangsspanning is dus gelijk aan de geïnverteerde waarde van de som van de ingangsspanningen. Het aantal te sommeren ingangsspanningen is in principe onbeperkt. Wel moet u er voor zorgen dat de som van alle ingangsspanningen, vermenigvuldigd met de door de weerstanden ingestelde versterkingsfactoren, niet tot oversturing van de versterker leidt.

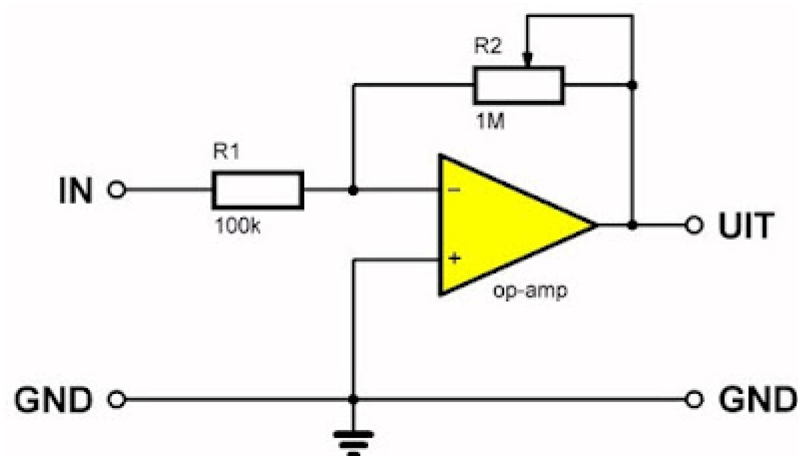


De sommeer-versterker met twee ingangen. (© 2020 Jos Verstraten)

Uit de algemene formule volgt dat u aan iedere ingang een eigen versterkingsfactor kunt toekennen door de verhouding R_{uit}/R_{in} aan te passen, waarbij R_{in} de serieweerstand is van de betreffende ingang en R_{uit} de terugkoppel weerstand van de uitgang naar de inverterende ingang.

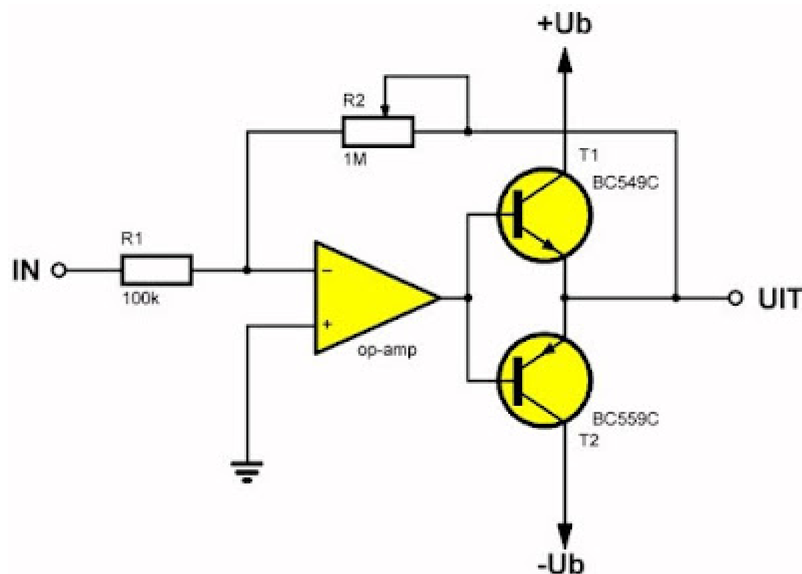
Een tweede voordeel van deze techniek is dat de inverterende ingang van de versterker op massa-potentiaal staat. Het mengen gebeurt alleen maar door de stroomverdeling in het sommeerpunt. De diverse ingangssignalen '*zien*' elkaar dus niet en kunnen elkaar ook niet beïnvloeden. Men noemt deze schakeling dan ook een '*mengversterker met virtueel massa-punt*'.
De ingangssignalen kunnen natuurlijk ook wisselspanningen zijn. De uitgangsspanning zal dan op ieder moment gelijk zijn aan de geïnverteerde en versterkte som van de momentele waarden van alle ingangsspanningen.
De nauwkeurigheid van het mengproces is alleen afhankelijk van de nauwkeurigheid van de weerstanden. Gebruikt u weerstanden met een tolerantie van 1 %, dan zal de uitgangsspanning binnen 1 % gelijk zijn aan de berekende waarde.

Versterker met instelbare versterking
Vaak zal het noodzakelijk zijn versterkers te ontwerpen met regelbare versterkingsfactor. U kunt dan de schakeling van de onderstaande figuur toepassen. Met deze schakeling kunt u de versterking van de trap tussen 1 en 10 regelen. De schakeling heeft een constante ingangsweerstand van 100 kΩ.



Een versterker met instelbare versterking. (© 2020 Jos Verstraten)

Het verhogen van de uitgangsstroom
De meeste operationele versterkers zijn in staat een uitgangsstroom van ongeveer 10 mA tot 25 mA aan de belasting te leveren of van de belasting op te nemen. Vaak is dit te weinig en dan kunt u gebruik maken van de schakeling van de onderstaande figuur. Door de uitgang van de operationele versterker af te sluiten met een uit twee complementaire transistoren opgebouwde buffer kunt u de stroomcapaciteit opvoeren tot ongeveer 100 mA á 250 mA, afhankelijk van de toegepaste transistoren.
De transistoren zijn als emittervolger geschakeld en verbruiken bijgevolg zeer lage basisstromen. De niet-lineariteiten in de transistorkarakteristieken (overnamevervorming) worden door de grote open-lus versterking van de operationele versterker gecompenseerd. Wilt u echter de vervorming van de schakeling minimaliseren, dan is het toch wel nodig een bepaalde instelstroom voor de basissen aan te brengen.



Complementaire uitgangstrap voor het verhogen van de stroomcapaciteit. (© 2020 Jos Verstraten)

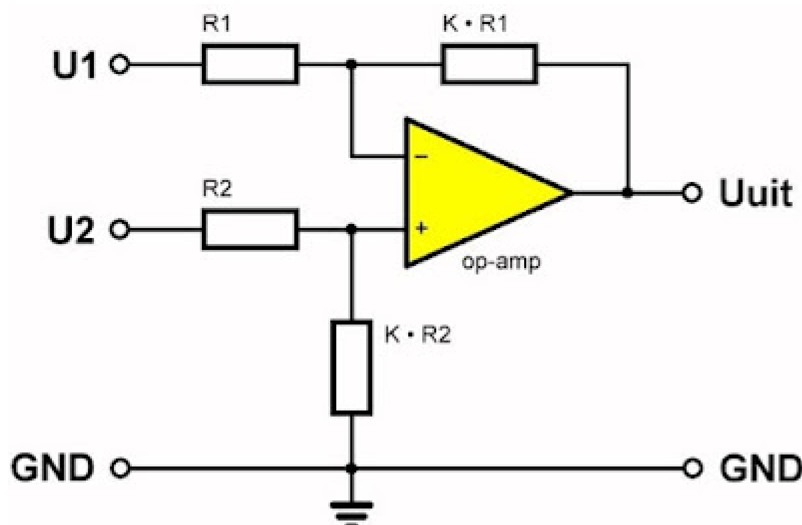
De verschilversterker of differentiële versterker

Soms moet u de spanning tussen twee '*hete*' punten van een schakeling meten, zodat het onmogelijk is de massa als nul-referentie te gebruiken. Denk bijvoorbeeld aan het meten van de spanningsval over een stroomsensor weerstand of het meten van de balans van een brugschakeling.

Voor dit soort toepassingen kunt u gebruik maken van de verschilversterker van de onderstaande figuur. U kunt berekenen dat de uitgangsspanning gelijk is aan:

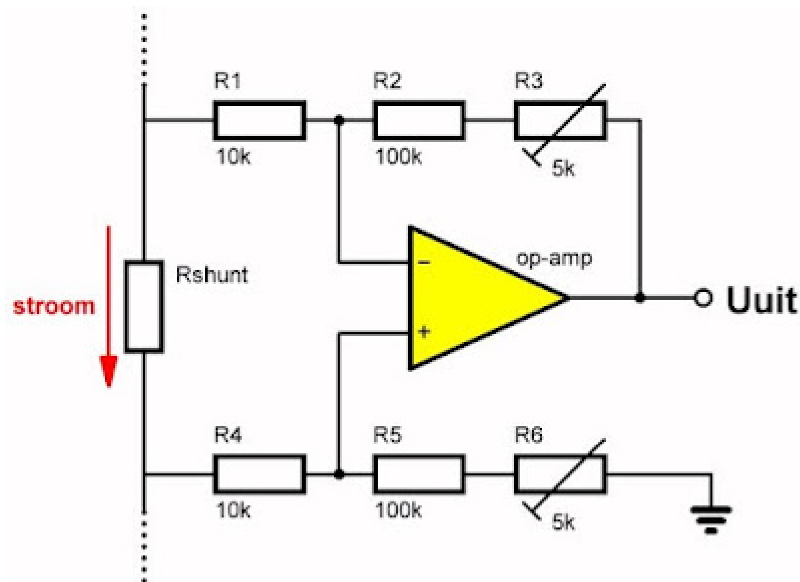
$U_{uit} = K \bullet [U_2 - U_1]$

De nauwkeurigheid van de schakeling is volledig afhankelijk van de tolerantie van de weerstanden. De schakeling kan afgeregeld worden door de twee ingangen met dezelfde spanning te verbinden en bijvoorbeeld de K-weerstanden af te regelen tot de uitgangsspanning precies gelijk is aan nul.



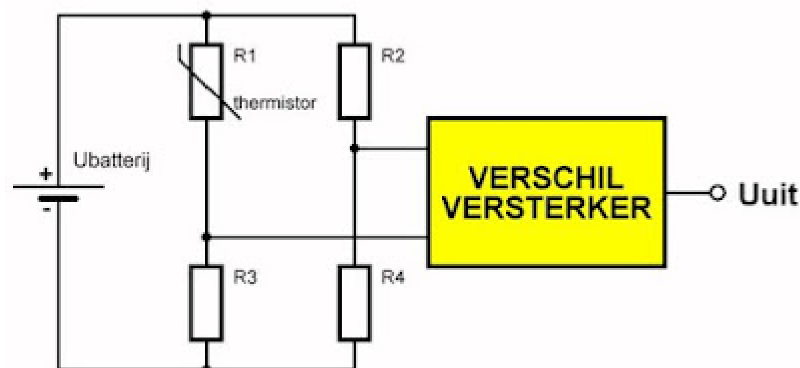
Het basisschema van een verschilversterker. (© 2020 Jos Verstraten)

De onderstaande figuur geeft een voorbeeld van het gebruik van een verschilversterker bij het meten van de spanningsval over een shunt weerstand R_{shunt}. De spanning over dit onderdeel moet tien maal versterkt worden. De terugkoppel weerstanden zijn samengesteld uit een vaste weerstand en een instelpotentiometer. De versterkte uitgangsspanning staat ter beschikking tussen de uitgang van de operationele versterker en de massa en u kunt deze spanning dus op de normale manier meten.



Meten van de spanning over een shunt-weerstand. (© 2020 Jos Verstraten)

Een tweede voorbeeld van het gebruik van een differentiële versterker geeft de onderstaande figuur. De versterker moet de spanning tussen twee diagonale punten van een weerstandsbrug versterken. Dit soort schakeling kan van pas komen als u bijvoorbeeld een temperatuurmeter wilt bouwen met een temperatuur afhankelijke weerstand R1 als sensor in een brugschakeling.

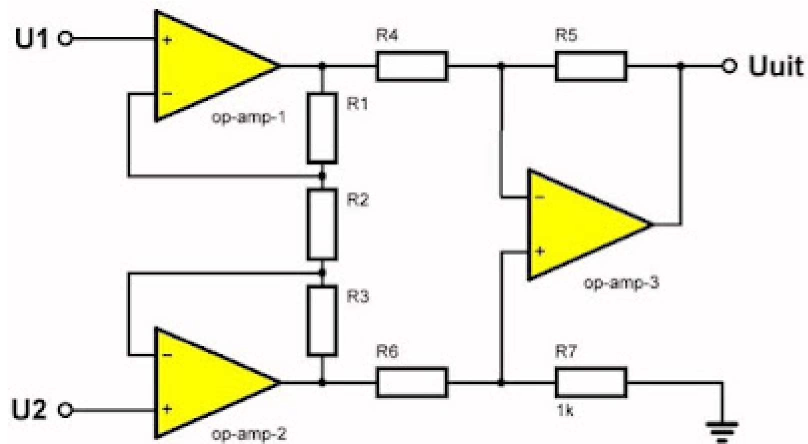


Meten van een brugspanning met een verschilversterker. (© 2020 Jos Verstraten)

De instrumentatie versterker

De besproken verschilversterker heeft een tamelijk lage ingangsweerstand, die wordt bepaald door de waarde van de externe weerstanden. In de meeste gevallen mag de versterker de schakeling waarin wordt gemeten echter zo min mogelijk belasten, bijvoorbeeld bij brugmetingen.

Vandaar dat men vaak de eigenlijke verschilversterker vooraf laat gaan door twee buffers volgens het onderstaand schema. De twee ingangen van de schakeling worden verbonden met twee operationele versterkers, geschakeld als een iets aangepaste spanningsvolger (niet-inverterende versterker met een spanningsversterking van 1). Deze combinatie noemt men instrumentatie versterker en wordt als volledig geïntegreerd geheel aangeboden.



Het basisschema van een instrumentatie versterker. (© 2020 Jos Verstraten)

De op-amp als manusje-van-alles ...

In dit artikel hebben wij de meest toegepaste schakelingen rond de op-amp besproken, namelijk de spanningsversterkers. Natuurlijk kunt u met een op-amp nog veel meer ontwerpen, zoals:

- Schmitt-trigger schakelingen
- Integrerende schakelingen
- Differentiërende schakelingen
- Sinusgeneratoren
- Functiegeneratoren
- Gelijkricht schakelingen
- Frequentie-filter schakelingen

Kortom, een op-amp is écht een manusje-van-alles in de analoge elektronica!